

BEITRAG AUS DER REIHE:

Karl-Heinz Lotze, Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik Band 5 Naturphänomene und Astronomie

ISBN 3 - 7896 - 0666 - 9

Verlag Palm & Enke, Erlangen und Jena 2002

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage

www.solstice.de

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Tilmann Denk

GALILEOs Flug zum Jupiter

1 Einleitung

Die NASA-Raumsonde Galileo war das erste Raumschiff, das in eine Umlaufbahn um den Planeten Jupiter einschwenkte. Zuvor hatte der größte Planet des Sonnensystems zwar schon des öfteren Besuch erhalten (vgl. Tab. 1), aber alle diese Sonden passierten ihn auf einer hyperbolischen Bahn; konnten also allenfalls für wenige Tage oder Wochen intensive Studien betreiben. Jupiter kreist in einer mittleren Entfernung von 778 Millionen km oder 5,2 Astronomischen Einheiten etwa in der Ekliptikebene auf einer nahezu kreisförmigen Bahn um die Sonne und wird dabei von mindestens 28 Monden begleitet (Tab. 2).

Die Ziele der Galileo-Mission sind die Erkundung der Atmosphäre, des Magnetfeldes und des inneren Aufbaus von Jupiter sowie die Erforschung der Jupitermonde und -ringe. Die Jupitermonde lassen sich in fünf Gruppen aufteilen. Ganz innen kreisen vier kleinere Monde - Metis, Adrastea, Amalthea und Thebe. Ihre Bahnen liegen in der Äquatorebene Jupiters. Die Rotationen sind gebunden, das heißt, dass sie Jupiter immer dieselbe Seite zuwenden (wie auch unser Erdmond der Erde immer dieselbe Seite zuwendet). Sie sind von der Erde aus nur in großen Fernrohren sichtbar. Die Galileosonde konnte sie wiederholt beobachten.

In Entfernungen zwischen 421000 km und 1,9 Millionen km vom Jupiterzentrum entfernt bewegen sich die Monde Io, Europa, Ganymed und Callisto (Abb. 1 und 2). Mit Durchmessern zwischen etwa 3100 und 5300 km gehören sie neben dem Saturnmond Titan und unserem Erdmond zu den größten Monden des Sonnensystems. Bis auf Io, der praktisch wasserfrei ist, bestehen ihre Oberflächen im Wesentlichen aus Wassereis. Alle vier besitzen keine nennenswerten Atmosphären. Sie wurden zuerst von Galileo Galilei im Jahre 1610 beschrieben und heißen deshalb „Galileische Monde“. Ihre relativ großen Massen erlauben Raumsonden Bahnmanöver durch den Swingby-Effekt. Dies ist von großer Wichtigkeit für Galileo, da hierdurch enorme Mengen an Treibstoff gespart werden können. Die Galileischen Monde zeigen sehr verschiedenartige Oberflächenstrukturen und geologische Vergangenheiten. Daher war ein großer Teil der Ressourcen Galileos der Erforschung dieser Himmelskörper gewidmet, die ebenfalls wie die kleinen inneren Monde gebunden rotieren.

Weiter außen kreisen 20 weitere Monde, von denen 12 erst im Jahr 2000 entdeckt wurden. Sie sind fast alle kleiner als 100 km im Durchmesser. Ihnen kam Galileo niemals nahe, und sie wurden auch bislang nicht von Raumsonden beobachtet. Die einzige Ausnahme ist der größte der äußeren Monde, Himalia (150 km Durchmesser); er wurde von der Cassini-Raumsonde Mitte Dezember 2000 aus größerer Distanz fotografiert. Die äußeren Monde bewegen sich auf geneigten Bahnen



Abb. 1: Jupiter mit Großem Rotem Fleck (links), die Galileischen Monde (von oben nach unten: Io, Europa, Ganymed und Callisto) sowie die kleinen Monde Amalthea und Thebe (oben rechts) im Größenvergleich.

und rotieren nicht mehr gebunden. Ihre Eigenrotationsperioden sind aber nicht bekannt. Die Oberflächen sind dunkel und ähneln kohlenstoffhaltigen Planetoiden des C, D oder F-Typs. Vermutlich stammen sie ursprünglich auch aus dem Asteroidengürtel.

2 Jupiter und die Monde

Jupiter (Abb. 1) ist mit einem Durchmesser von 142984 km (äquatorial) bzw. 133708km (polar) am 1-bar-Level der größte Planet im Sonnensystem und besitzt mehr Masse als alle anderen Planeten zusammen. Er besteht wie die Sonne zu etwa 3/4 aus Wasserstoff, zu 1/4 aus Helium und zu etwa 2% aus anderen Elementen. An der sichtbaren Oberfläche, 71400 km vom Zentrum entfernt, blickt man auf Ammoniak- (NH_3), Ammoniumhydrogensulfid- (NH_4SH) und Wasserwolken (H_2O). Einige wenige Stellen, insbesondere in der Äquatorgegend, sind auch wolkenfrei. Diese Stellen werden als „5-Micron-Hot-Spots“ bezeichnet, da ihre Temperatur etwas über der Umgebungstemperatur liegt, was im Wellenlängenbereich nahe $5\mu\text{m}$ mit irdischen Teleskopen gut gesehen werden kann.

Im Fernrohr erscheint die Wolkenoberfläche „gebändert“: Helle Zonen und dunkle Gürtel wechseln sich ab. Die Eigenrotationsperiode beträgt 9 Stunden 56 Minuten, und die Windgeschwindigkeiten nahe der sichtbaren Wolkenoberfläche erreichen bis zu 500 km/h. Die wohl bekannteste Wetterstruktur ist der Große Rote Fleck, ein etwas über die Umgebung ragender riesiger Wirbelsturm, in den die Erde dreimal hineinpassen würde und der vermutlich schon seit vielen Hundert Jahren auf dem Jupiter existiert.

In Richtung Zentrum steigen Temperatur und Druck an. In einigen tausend Kilometern Tiefe wird der Wasserstoff „fluid“; Gasphase und Flüssigkeit lassen sich nicht mehr unterscheiden. In vielleicht 10000km Tiefe, bei einer Temperatur von 6000Grad und einem Druck von 1 Mbar, nimmt er „metallische“ Gestalt an. Elektronen und Protonen werden getrennt und bilden ein Plasma. Strömungen in diesem riesigen Mantel aus metallischem Wasserstoff sind die Ursache für das immens starke Magnetfeld Jupiters, das sich millionen Kilometer in den Raum erstreckt und — wenn man es mit bloßem Auge sehen könnte — noch von der Erde aus etwa so groß erscheinen würde wie der Vollmond am Himmel. Tief im Inneren des Jupiters schließlich vermutet man einen Gesteins- und Eisenkern, der vielleicht größer als die Erde ist. Die Temperatur beträgt dort 17000Grad, der Druck 70Mbar. Diese Regionen sind aber Beobachtungen nicht zugänglich, so dass diese Angaben nur auf Modellrechnungen gestützt werden können.

Io ist der vulkanisch aktivste Körper im Sonnensystem. Obwohl nur etwa so groß wie unser Erdmond (der geologisch „tot“ ist), lassen sich auf fast allen Bildern vulkanische Zentren, und auf vielen Aufnahmen sogar aktive Eruptionen beobachten — manche bis zu 400 km hoch! Dafür lassen sich keine Impaktkrater entdecken, ein weiteres Indiz für eine geologisch junge Oberfläche. Die Ursache für den extremen Vulkanismus ist die Gezeitenreibung infolge einer 2:1-Bahnreso-

nanz mit dem weiter außen kreisenden Mond Europa zu suchen. Die europasche Umlaufperiode ist exakt doppelt so lang wie die iosche; dadurch ist bedingt, dass sich beide Monde immer etwa an denselben Stellen ihrer Bahnen nahe kommen. Dies wiederum hat zur Folge, dass leichte Bahnstörungen der Iobahn durch Europa vor allem aus einer bestimmten Richtung erfolgen, anstatt zufällig verteilt zu sein. Europa zwingt damit dem normalerweise auf einer perfekten Kreisbahn um Jupiter umlaufenden Io eine leichte Exzentrizität auf. Eine Bahnexzentrizität größer null bedeutet aber, dass Io im Gravitationsfeld Jupiters etwas „auf und ab“ wandert, und dass die Bahngeschwindigkeit nicht konstant ist (gemäß dem 2. Keplerschen Gesetz). Die Eigenrotation hingegen ist konstant; Io zeigt also eine Libration. Dazu kommt noch, dass Io nicht kugelförmig ist, sondern eher einem Ellipsoiden ähnelt. Der längste Radius (orientiert parallel zu der Achse, die zu Jupiter hinweist) ist 1830 km groß, der kürzeste (orientiert parallel zur Rotationsachse) 1815 km.



Abb. 2: Vulkankrater "Tupan Patera" auf Io. Die Struktur ist etwa 75 km groß und wird von rund 900 m hohen Klippen umgeben. Aufgenommen am 16. Oktober 2001 ist dies eines der letzten Bilder, welche die Galileosonde zur Erde übertragen hat.

Diese beiden Effekte - das „Auf und Ab“ im Jupitergravitationsfeld und die Libration - verursachen zeitlich variable Kräfte im Inneren von Io. Sie sind beide in etwa gleich stark an der inneren Aufheizung beteiligt. Befindet sich Io im jupiter nächsten Punkt der Bahn, sind die Jupitergravitationskräfte an der (sich außerhalb des Kräftegleichgewichts befindenden) Oberfläche etwas stärker als im jupiterfernen Bahnpunkt. Bei der Libration zeigt die lange Achse des Io-Ellipsoiden nicht

mehr exakt auf Jupiter, so dass eine zeitlich nicht konstante Rückstellkraft auftritt. All diese Kräfte erzeugen Massenbewegungen im Inneren und damit aufgrund der Reibung thermische Energie, welche über die zahlreichen Vulkane wieder nach außen entweicht. Noch ist unklar, wo genau im Inneren der Iokugel die Energie dissipiert wird, vermutlich dürfte dies aber zu einem Großteil in relativer Nähe zur Oberfläche geschehen, wo auch die Magmakammern vermutet werden.

Der Io-Vulkanismus besteht sowohl aus Silikat- als auch aus Schwefelvulkanismus. Die silikatischen Laven ähneln der Lava auf Hawaii, nur dass sie zum Teil noch höhere Temperaturen besitzen - eine Galileoaufnahme des Vulkans Pillan lässt Lavatemperaturen bis 1800°C vermuten. Wenn flüssige Lava das kalte Schwefeldioxid der umgebenden Oberfläche erreicht, verdampft dieses explosionsartig. Dies dürfte eine Ursache für die über 100 km ins All reichenden Eruptionsfontänen sein. Die Schwefellaven sind, anders als die silikatischen Laven, hell und kühl. Es wird geschätzt, dass etwa 2% der Io-Oberfläche von silikatischen und genausoviel von frischen Schwefellaven bedeckt ist.

Raumsonde	Start	Ankunft	Bemerkungen
Pioneer 10	03.03.1972	03.12.1973	Erste Raumsonde zum Jupiter
Pioneer 11	06.04.1973	04.12.1974	Erste Sonde zu Jupiter u. Saturn
Voyager 1	05.09.1977	05.03.1979	Entdeckung des Io-Vulkanismus
Voyager 2	20.08.1977	09.07.1979	Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun-Sonde
Ulysses	06.10.1990	08.02.1992	Sonnensonde
Galileo	18.10.1989	07.12.1995	1. Jupiter-Orbiter u. Eintauchsonde
Cassini	15.10.1997	30.12.2000	Flyby auf dem Weg zum Saturn

Tab. 1: Raumsonden zum Jupiter.

Europa weist eine eisige Oberfläche mit nur wenigen Kratern auf, dafür finden sich dort zahllose lineare Strukturen, die sich zum Teil über mehrere tausend Kilometer erstrecken. Hochaufgelöste Galileoaufnahmen haben gezeigt, dass die Europaoberfläche im Wesentlichen in „hügeliges, chaotisches Terrain“ und „von (Doppel-)Bergrücken durchzogene Gebiete“ eingeteilt werden kann. Einige Strukturen lassen auf tektonische Aktivität schließen.

Gezeitenreibung (bedingt durch eine 2:1-Resonanz mit Ganymed) ist bei Europa weniger ausgeprägt als bei Io, könnte aber noch ausreichen, um einen weiten Bereich unter der obersten Wassereiskruste bis in etwa 150 km Tiefe flüssig zu halten. Damit wäre Europa der erste Körper im Sonnensystem außerhalb der Erde, auf dem nennenswerte Mengen flüssigen Wassers in Verbindung mit einer festen Oberfläche vorkommen könnten. Die Wassermenge könnte sogar das 2-3fache der irdischen Ozeane betragen. (Anmerkung: Die Vorkommen an flüssigem Wasser auf dem Mars, über die vor einiger Zeit berichtet wurde, sind günstigstenfalls nur sehr gering. Das meiste Mars-H₂O, so die Vermutungen, liegt als Permafrost im Boden.)

Die „Ozeanfrage“ Europas ist bislang nicht entschieden, dennoch gibt es verschiedene „Lines of evidence“ in den Galileodaten, welche entweder für oder gegen die heutige Existenz eines unterirdischen Ozeans sprechen. (Anmerkung: Korrekt wäre der Begriff „Hydrosphäre“, da „Ozean“ eine freie Wasseroberfläche einschließt. Bei Europa hat sich aber eingebürgert, vom „Ozean“ zu sprechen.) Sie ist wohl der wichtigste Forschungsgegenstand der Galileomission, da das Vorhandensein eines Reservoirs von flüssigem Wasser außerhalb der Erde einen „heißen“ Kandidaten für einen zweiten Ort im Universum darstellt, an dem sich Leben entwickelt haben könnte. 1 1/2 Jahre der Galileomission wurden deshalb fast ausschließlich der Erkundung Europas gewidmet. Die Ozeanfrage wird später noch in einem eigenen Unterkapitel behandelt ¹⁾).

Ganymed ist der größte Mond im Sonnensystem, sein Durchmesser (nicht aber seine Masse) übersteigt sogar denjenigen des Planeten Merkur, der 4880 km beträgt. Aus der Ferne lässt sich eine globale Dreiteilung beobachten. Es gibt dunkle und helle Gebiete sowie die eisigen Polkappen. Die dunklen Regionen sind von Kratern übersät und geologisch älter als die helleren. Bereits die ersten Nahaufnahmen Galileos beendeten einen Streit, der durch die niedriger aufgelösten Voyagerbilder entstanden war. Es stellte sich heraus, dass die hellen Gebiete, welche häufig die dunkleren zu „teilen“ scheinen, tektonischen Ursprungs sind. Vermutlich hat sich in der Frühzeit des Sonnensystems die Kruste Ganymeds ausgedehnt, wodurch die charakteristischen Bergrücken und Gräben entstanden sind.

Eine besondere Überraschung lieferte das Magnetometerexperiment. Ganymed besitzt ein Eigenmagnetfeld - ein Befund, der nicht vorausgesagt wurde. Dieses Magnetfeld ist immerhin so stark, dass Teile der Oberfläche in äquatorialen Breiten gegenüber dem Einfluss des Jupitermagnetfeldes fast vollständig abgeschirmt werden. Schwerefeldmessungen ergaben zudem, dass das Innere von Ganymed fast vollständig differenziert ist. Ganymed besteht also aus einer äußeren, etwa 800 km dicken Eiskruste, einem Silikatmantel und einem Kern aus Eisen oder Eisensulfid (FeS). Der Kern dürfte für das Magnetfeld verantwortlich sein.

Callisto, obwohl nicht wesentlich kleiner als Ganymed, dürfte hingegen nur schwach differenziert sein. Die bei der Entstehung gespeicherte Wärme ging schneller verloren, so dass Eisen, Silikate und Wassereis im Inneren nur unwesentlich entmischt werden konnten. Auch die Oberfläche weist auf einen geologisch völlig inaktiven Körper hin. Sie ist dominiert von kleinen und großen Einschlagskratern sowie von riesigen konzentrischen Ringgebirgen, welche auf gi-

¹⁾ In den Jupiterwolken werden ebenfalls Regentropfen vermutet, die allerdings „ins Bodenlose“ fallen und schließlich in tieferen Schichten bei hohen Temperaturen wieder verdampfen, ohne einen Ozean oder Fluss zu formen. Es wird angenommen, dass sich unter solchen Bedingungen kein Leben bilden kann. Mars hingegen könnte durchaus Lebensformen beherbergen.

gantische Einschläge vor Milliarden Jahren hinweisen. Das größte Ringgebirge, Valhalla, hat einen Durchmesser von über 4000 km.

Galileo entdeckte einen merkwürdigen „Mangel“ an kleinen Kratern. Callisto scheint von einer mehrere Dutzend Meter dicken Schicht aus unbekanntem, dunklem Material bedeckt zu sein, das die kleinen Krater begraben hat und daher offenbar jüngeren Datums sein muss. Die Ursache für dieses Phänomen ist noch unbekannt.

Name	Radius in km	Umlaufzeit in Tagen	gr. Bahnhalbachse in km	Bahnexzentrizität	Bahninklination in Grad	Jahr der Entdeckung
Jupiter	71492	4330,6	778.300.000	0,048	1,30	--
Metis	17x30	0,2948	127960	0,00	0	1979
Adrastea	7x10	0,2983	128980	0,00	0	1979
Amalthea	64x125	0,4980	181300	0,003	0,4	1892
Thebe	42x58	0,6745	221900	0,01	0,8	1979
Io	1820	1,769	421600	0,004	0,04	1610
Europa	3121	3,551	670900	0,009	0,47	1610
Ganymed	5268	7,155	1070000	0,002	0,21	1610
Callisto	4817	16,689	1883000	0,007	0,28	1610
S/1975 J1	3	130,0	7398000	0,21	45	1975/2000
Himalia	75x60	251	11480000	0,16	28	1904
Elara	40	260	11737000	0,21	28	1905
Lysithea	20	259	11720000	0,11	29	1938
Leda	8	239	11094000	0,15	27	1974
S/2000 J11	2	290	12623000	0,22	29	2000
Ananke	15	631	21200000	0,17	147	1951
Carme	22	692	22600000	0,21	163	1938
Pasiphae	35	735	23500000	0,38	148	1908
Sionpe	20	758	23700000	0,28	153	1914
und 10 weitere in 2000 entdeckte Minimonde auf vergleichbaren Bahnen						

Tab. 2: Daten von Jupiter und seinen Monden

Die **kleinen, inneren Jupitermonde** Amalthea, Thebe, Metis und Adrastea sind kartoffelförmige Gesteins- oder Eisbrocken, die von zahlreichen Impaktkratern bedeckt sind. Sie haben eine besondere Bedeutung für die **Jupiterringe**. Es wurde mit Hilfe der Galileodaten nachgewiesen, dass diese Monde für die Entstehung und Feinstruktur der Ringe verantwortlich sind. Staubpartikel, die von Mikrometeoriten von den Oberflächen losgeschlagen werden, sammeln sich in der Jupiterumlaufbahn und wandern im Laufe der Zeit nach innen, bis sie in den Jupiter stürzen. Interessanterweise ist der vom kleinsten Mond Adrastea erzeugte Ring am deutlichsten ausgeprägt. Ohne diese Monde würde das Jupiterringsystem innerhalb von wenigen Millionen Jahren verschwinden.

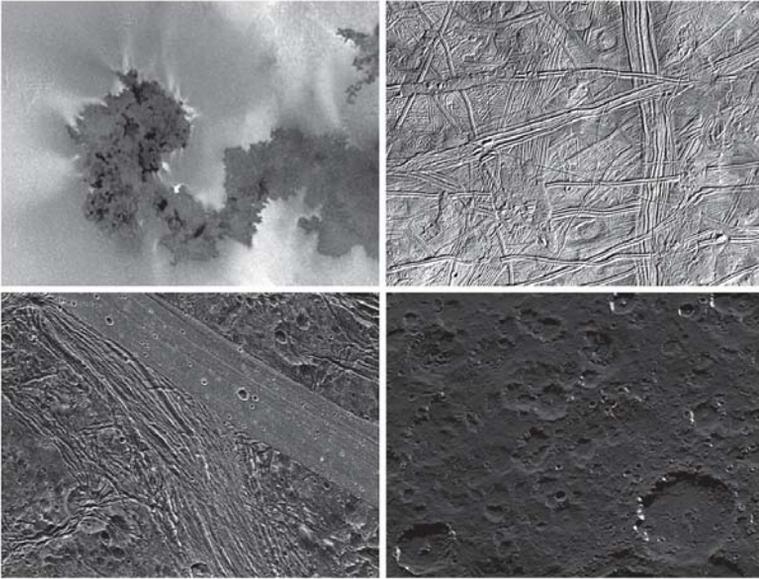


Abb. 3: Die Oberflächen der Galileischen Monde im Vergleich. Die Bildauflösung beträgt 180 Meter pro Bildpunkt (m/pxl). Oben links: Io; oben rechts: Europa; unten links: Ganymed; unten rechts: Callisto.

3 Galileos Flug zum Jupiter

Die Galileo-Mission wurde bereits Ende der 70er Jahre ins Leben gerufen. Ungewöhnlich ist das Design des Galileo-Orbiters, der aus einem rotierenden und einem „inertialen“ Teil besteht. Am rotierenden Ende befestigt sind die entfaltbare, regenschirmartige, große Antenne (HGA; high gain antenna), eine kleine Rundstrahlantenne (LGA; low gain antenna), der Magnetometerarm, die beiden Radioisotopenbatterien, erhebliche Teile der Bordelektronik, ein Bandgerät zur Datenaufzeichnung („Tape Recorder“) sowie die Felder- und Partikelinstrumente wie z.B. der Staubdetektor. Am nichtrotierenden Teil befindet sich die schwenkbare Plattform, auf der die Fernerkundungsinstrumente wie Kamera (SSI; steht für Solid State Imaging), Infrarot-Spektrometer oder UV-Spektrometer montiert sind. Außerdem finden sich dort das Lageregelungssystem, das in Ottobrunn bei München gefertigte Haupttriebwerk sowie eine zweite, separate Raumsonde, die „Atmosphären-Eintauchsonde“, im amerikanischen „Probe“ genannt. Ihre Aufgabe war es, in die Jupiteratmosphäre einzudringen und am Fallschirm hängend grundlegende physikalische, chemische, meteorologische usw. Parameter der Jupiteratmosphäre zu messen und zum Orbiter zu senden. Galileo sollte ab Juni 1985 als Nachfolger der erfolgreichen Voyager-Sonden das Jupitersystem im De-

tail studieren. Aufgrund technischer Probleme und Verzögerungen, u.a. mit dem Space Shuttle, wurde der Start wiederholt verschoben, zuletzt auf Mai 1986. Im Januar 1986 verunglückte die Raumfähre Challenger beim Start, so dass auch die Galileo-Mission für unbestimmte Zeit verschoben werden musste. Galileo wurde zunächst von Florida nach Pasadena (Kalifornien) zurückgebracht, wo die Sonde ursprünglich zusammengebaut wurde. Später wurde dann entschieden, dass die Centaur-Raketenoberstufe, die mit flüssigem Wasserstoff und Sauerstoff angetrieben werden sollte und in der Lage gewesen wäre, Galileo direkt von der Erde zum Jupiter zu befördern, für einen Einsatz mit dem Space Shuttle zu gefährlich sei. Es musste also auf eine schwächere Oberstufe zurückgegriffen werden, die von ihrer Schubkraft her allein nicht in der Lage gewesen wäre, Galileo zum Jupiter zu bringen.

Aus dieser Not heraus wurde die Idee geboren, Galileo durch Swingby- oder Gravity-Assist-Manöver dreimal an inneren Planeten vorbeizulenken (1x Venus, 2x Erde), um so genügend kinetische Energie für die Reise zum Jupiter zu gewinnen. Diese Variante hat den Nachteil, dass sich die Reisezeit von ursprünglich etwa drei auf über sechs Jahre erhöht. Der neue Starttermin war inzwischen auf Oktober 1989 festgelegt worden, was bedeutete, dass die Sonde schließlich im Dezember 1995, 20 Jahre nach Projektbeginn, am Jupitersystem eintreffen würde. Es ergaben sich aber auch Vorteile: Vorbeiflüge an Venus und Erde lassen eine detaillierte Erkundung dieser Planeten und des Erdmondes zu. Außerdem waren zwei nahe, gezielte Asteroidenvorbeiflüge möglich.

Der Start erfolgte problemlos am 18. Oktober 1989 mit dem Space Shuttle Atlantis, und schon wenige Stunden später wurde Galileo auf den Weg zur Venus geschickt. Die jetzt folgende, 6 Jahre und 2 Monate dauernde Cruise-Phase, brachte einige Überraschungen, aber auch Enttäuschungen. So öffnete sich die Hauptantenne nur teilweise, und trotz intensiver Bemühungen über mehrere Jahre hinweg blieben einige Streben verklemmt, und die Antenne konnte nie vollständig geöffnet werden. Sie war damit nutzlos, und die gesamte Kommunikation musste über die kleine Antenne (LGA) abgewickelt werden. Dies bedeutete insbesondere für die Bildausbeute am Jupiter große Probleme. Zum Glück konnten Datenkompressionsmethoden entwickelt und auf die (auf der Technologie der frühen 80er Jahre basierenden!) Bordcomputer Galileos überspielt werden. Letztlich konnte mit Hilfe des Tape Recorders (der jetzt eine zentrale Rolle spielte) zwar nur etwa 2% der ursprünglich geplanten Datenmenge gewonnen werden. Da aber z.B. bei nahen Vorbeiflügen an Monden sowieso nur ein sehr begrenzter Zeitraum zur Bildaufnahme zur Verfügung steht, da die zu beobachtenden Gebiete jetzt noch sorgfältiger ausgewählt wurden und da die Daten der Probe von dem Problem nicht berührt wurden, wurde die Ansicht geäußert, dass etwa 50% der ursprünglich geplanten Wissenschaft auch durchgeführt werden konnte. Und wenn man die Resultate im nachhinein betrachtet, scheint das eher noch untertrieben zu sein.

Die vielleicht deutlichsten Einbußen lagen in der Langzeitbeobachtung des Jupiterwetters, die völlig ausfiel, und in der Beobachtung der Galileischen Monde in mehreren Farbkanälen und unter verschiedenen Phasenwinkeln.

Trotz des Antennenausfalls gelangen Galileo bereits in der Cruise-Phase bedeutende Entdeckungen und Ersttaten. So erfolgte am 29. Oktober 1991 der erste nahe Vorbeiflug an einem Asteroiden in der Geschichte der Raumfahrt. Von (951) Gaspra wurden einige Dutzend Bilder zur Erde gesandt. Der Nordpol und die „Bugseite“ unseres Erdmondes konnte erstmals multispektral kartiert werden, und eine Woche vor Weihnachten „filmte“ Galileo den Erdmond, wie er vor unserem Heimatplaneten vorüberzog. Die bedeutendste Entdeckung aber gelang beim zweiten Asteroidenvorbeiflug. Es stellte sich heraus, dass der etwa 50 km durchmessende Asteroid (243) Ida einen 1,5 km großen Mond besitzt. Das war sehr überraschend, sollte man doch annehmen, dass ein so kleiner Brocken nicht über einen Zeitraum von schätzungsweise 2 Milliarden Jahren von einem solchen, relativ kleinen Mutterkörper gravitativ festgehalten werden kann. Schließlich konnte auch noch der Komet Shoemaker-Levy-9 bei seinem Sturz in die Jupiteratmosphäre im Juli 1994 beobachtet werden. Galileo war das einzige astronomische Gerät, das aufgrund seines besonderen Standortes die Impaktstellen direkt beobachten konnte. Für alle irdischen Teleskope lagen die Einschlagsorte hinter der Jupiterscheibe, und erst die Folgen der Einschläge konnten von der Erde aus (dann allerdings sehr gut) detektiert werden.

Am 13. Juli 1995 schließlich erfolgte das Abtrennen der Probe. Hierfür wurde das gesamte Galileoraumschiff auf Kollisionskurs mit Jupiter gebracht und auf 10 Umdrehungen pro Minute hochgefahren. Die Abtrennung der nicht steuerbaren Probe erfolgte problemlos, und anschließend wurde Galileos Bahn mit Hilfe des deutschen Triebwerks so umgelenkt, dass die Sonde auf dem richtigen Kurs für ein Gravity-Assist-Manöver mit dem Mond Io war. (Tatsächlich befand sich Galileo dann auf Kollisionskurs mit Io, aber das konnte leicht korrigiert werden.) Im Oktober wurde ein globales 5-Farbenbild von Jupiter und zwei seiner Monde sowie der Stelle, in welche die Probe eintauchen sollte, aufgenommen und auf Band gespeichert. Anschließend wurde das Band zurückgespult, ohne jedoch wieder zu stoppen. Erst 16 Stunden später konnte es „von Hand“ per Funkbefehl gestoppt werden. Da nach dem Ausfall der Hauptantenne dem Tape Recorder eine zentrale Bedeutung zufiel, hätte sein Ausfall eine wissenschaftliche Katastrophe bedeutet. Zum Glück war aber das Band nicht gerissen, sondern die Antriebsrolle „scheuerte“ lediglich unter dem feststeckenden Band. Durch Bewegen in die andere Richtung konnte es wieder losgemacht werden. Allerdings war unklar, wie beschädigt die betroffene Stelle war, und so wurde beschlossen, die angescheuerte Stelle unter 25 Windungen zu verstecken und nie wieder zum Vorschein kommen zu lassen. Auch die fünf Jupiterbilder befinden sich noch dort, und werden vielleicht nie zur Erde übertragen werden.

Dies war jedoch nicht der einzige Verlust. Etwa 16% des Bandes waren jetzt nicht mehr verwendbar. Außerdem wurden die Io-Beobachtungen bei der Ankunft am Jupiter gestrichen. Dies wog besonders schwer, weil anschließend kein gezielter Io-Vorbeiflug mehr vorgesehen war. Die Io-Bahn befindet sich nämlich so tief in den Strahlungsgürteln des Jupitermagnetfeldes, dass weitere nahe Vorbeiflüge als zu riskant für die Bordelektronik eingestuft wurden. In den wenigen Stunden der Ankunft am Jupiter nahm die Sonde etwa 1/3 der Strahlendosis auf, für die sie ausgelegt war. (Tatsächlich erfolgten erst ab Oktober 1999 weitere gezielte Io-Vorbeiflüge).

Am 7. Dezember 1995 schließlich erreichte Galileo das Jupitersystem. Zunächst flog die Sonde in etwa 32000 km an Europa vorbei, und anschließend in 892 km Distanz an Io. Der Io-Vorbeiflug lieferte bereits 1/4 der zum Abbremsen in die Jupiterumlaufbahn nötigen Energie. Die Probe trat indessen mit 170000 km/h in die Jupiteratmosphäre ein und wurde innerhalb von zwei Minuten aerodynamisch auf 160 km/h abgebremst. Anschließend öffnete sich der Fallschirm, und die Instrumente an Bord begannen mit ihren Messungen, welche kontinuierlich zum Orbiter gefunkt wurden. Etwa eine Stunde nach Missionsbeginn, in etwa 145 km Tiefe bei einer Außentemperatur von 153°C und einem Umgebungsdruck von 22 bar, stellte die Probe ihren Dienst ein. Doch die Daten befanden sich bereits auf dem Tape Recorder und im Hauptspeicher Galileos und konnten in den folgenden Monaten zur Erde übermittelt werden.

Eine Stunde nach Beendigung der Probe-Mission hatte sich Galileo gedreht und begann mit dem Bremsmanöver. Das Triebwerk funktionierte zum zweiten Mal zufriedenstellend, und Galileo befand sich jetzt auf seiner ersten Umlaufbahn um Jupiter. Etwa 6 Monate später, am 27. Juni 1996, sollte der erste gezielte Ganymed-Vorbeiflug stattfinden.

4 Galileos Satelliten-Tour: 33 gezielte Monde-Vorbeiflüge in 7 Jahren

Für die ersten beiden Missionsjahre, die als nominelle Mission oder Primärmission bezeichnet wurden, waren elf Jupiterumläufe mit zehn gezielten Mondvorbeiflügen vorgesehen (Tab. 3). Die Bezeichnungen der Vorbeiflüge oder Encounter bestand aus dem Anfangsbuchstaben des angeflogenen Mondes und der Orbitnummer.

Der erste Vorbeiflug an Ganymed war also G1, danach folgte im September 1996 G2, und im November C3, der erste Callisto-Vorbeiflug. Mit E4 und E6 im Winter 1996/97 gelangen die ersten höchstaufgelösten Europa-Aufnahmen, welche die komplexe Natur der Bergrücken und Chaos-Gebiete auf der Oberfläche enthüllten. Anschließend gab es nochmals zwei Ganymed-Vorbeiflüge (G7, G8) und zwei Callisto-Vorbeiflüge (C9, C10), und die Primärmission endete einige Wochen nach dem E11-Vorbeiflug im November 1997.

Die Strategie bei allen Vorbeiflügen war so, dass etwa eine Woche lang während des Durchflugs durch die Gefilde der Galileischen Monde Daten auf dem Tape

Recorder aufgezeichnet wurden, und im anschließenden, mehrere Wochen bis Monate währenden äußeren Teil der Bahn diese Daten dann nach und nach über die kleine Antenne zur Erde übertragen wurden.

Bez.	Mond	Datum	Vorbeiflughöhe in km	Bemerkungen
Pimärmission				
J0	Io	07.12.1995	892	keine Fernerkundung
G1	Ganymed	27.06.1996	835	Ganymed Magnetfeld entdeckt
G2	Ganymed	06.09.1996	262	Vorbeiflug am Nordpol
C3	Callisto	04.11.1996	1118	erster Vorbeiflug an Callisto
E4	Europa	19.12.1996	698	erster Vorbeiflug an Europa
E6	Europa	20.02.1997	587	Eisschollen entdeckt
G7	Ganymed	05.03.1997	3102	
G8	Ganymed	07.05.1997	1585	letzter Ganymed bis Mai 2000
C9	Callisto	25.06.1997	416	kleine Monde beobachtet
C10	Callisto	17.09.1997	524	Flug durch den Jupiterschatten
E11	Europa	06.11.1997	2293	Auftakt zum GEM
Galileo Europa Mission (GEM)				
E12	Europa	16.12.1997	200	schärfste Europa-Bilder
E13	Europa	10.02.1998	3562	keine Fernerkundung
E14	Europa	29.03.1998	1649	--
E15	Europa	31.05.1998	2521	--
E16	Europa	21.07.1998	1837	Saving/ keine Daten
E17	Europa	26.09.1998	3582	--
E18	Europa	22.11.1998	2281	Saving/ keine Daten
E19	Europa	01.02.1999	1495	Flyby über Nachtseite
C20	Callisto	05.05.1999	1311	Verringerung des Perijoviums
C21	Callisto	30.06.1999	1047	bis dahin beste Io-Daten
C22	Callisto	14.08.1999	2296	Jupiterbeobachtungen
C23	Callisto	16.09.1999	1057	keine Fernerkundung
I24	Io	11.10.1999	612	erster Io-Vorbeiflug
I25	Io	26.11.1999	300	Savin/ teilweise Datenverlust
E26	Europa	03.01.2000	351	letzter Vorbeiflug an Europa
Galileo Millenium Mission (GMM)				
I27	Io	22.02.2000	199	perfekte Io-Passage
G28	Ganymed	20.05.2000	809	schärfste Ganymed-Bilder
G29	Ganymed	28.12.2000	2300	Cassini-Jupiter-Flyby
C30	Callisto	25.05.2001	138	letzter Callisto-Flyby
I31	Io	06.08.2001	216	Nordpol-Passage
I32	Io	16.10.2001	184	Südpol-Passage
I33	Io	17.01.2002	102	letzter Io-Flyby
A34	Amalthea	05.11.2002	250	erster Amalthea-Flyby
Ende	--	Jan. 2003	---	---
J35	Jupiter	21.09.2003	0	Jupiter-Impakt

Tabelle 3: Daten zu Galileos gezielt durchgeführten Vorbeiflügen an den Monden

Europa war inzwischen zum wichtigsten Forschungsziel erklärt worden, und so wurde der erste Abschnitt der Missionsverlängerung speziell diesem Mond gewidmet. Die Galileomission hieß daher seit Dezember 1997 „Galileo Europa Mission“, oder kurz „GEM“. Der erste Vorbeiflug der GEM an Europa, E12, war mit 200 km Abstand zur Oberfläche auch der dichteste. Diesem Vorbeiflug verdanken wir die schärfsten, wissenschaftlich ergiebigsten und vielleicht auch die dramatischsten Bilder Europas (vgl. z.B. Abb.4). Leider begannen mit Ablauf der Primärmission auch die technischen Probleme. Eine elektronische Komponente im Lageregelungssystem lieferte falsche Werte, so dass bei nachfolgenden Vorbeiflügen immer ein Korrekturfaktor vorausgesagt werden musste, damit die Kameras richtig zielen konnten. Außerdem ging das Raumschiff kurz vor Weihnachten in den „Saving mode“, so dass ein nicht unerheblicher Teil der E12-Daten verloren ging.

Bei E13 wurden keine Daten aufgezeichnet, um mehr Zeit für das Herunterspielen der E12-Daten zu haben. E14 und E15 gelangen trotz technischer Schwierigkeiten, doch kurz vor E16 versetzte der Bordcomputer Galileo erneut in einen Sicherheitsmodus, und die gesamten geplanten Aufnahmesequenzen wurden nicht ausgeführt. Dasselbe ereignete sich nochmals bei E18. Zwischenzeitlich wurde eine Software geschrieben, welche diese „Saving events“ unterbinden sollte. Ab C20 war sie einsatzbereit und hat sich seitdem über ein dutzend Mal bewährt.

Mit E19 endete der Europa-Teil, und Galileo konnte sich jetzt Io zuwenden. Die maximal vom Design her „zulässige“ Strahlendosis war bereits seit mehreren Monaten überschritten, doch zeigten Tests auf der Erde, dass Galileo eventuell eine weit höhere Strahlendosis aushalten könnte. Zudem war der Hauptteil der Mission schon gelaufen, so dass man jetzt auch nahe Io-Vorbeiflüge riskieren konnte. Um den jupiternächsten Punkt der Galileobahn abzusenken, wurden deshalb zunächst vier Callisto-Flybys durchgeführt. Im Oktober 1999 schließlich gelang der erste Io-Vorbeiflug trotz technischer Probleme. Nur eine Woche vor dem Vorbeiflug wurde eine Software geschrieben, die bei einem bestimmten Computerproblem das Raumschiff sehr schnell wieder aus dem Sicherheitsmodus befreien könnte. Genau so ein Problem trat 20 Stunden vor dem Io-Encounter ein, und die Vorsorge hatte sich in höchstem Maße gelohnt. Ein zweiter, diesmal polarer Vorbeiflug im November 1999 war ebenfalls teilweise erfolgreich, obwohl auch hier ein „Saving event“ nur vier Stunden (!) vor der nächsten Annäherung eintrat. Allerdings gingen diesmal die höchst aufgelösten Bilddaten und die Magnetometerdaten verloren. Im Januar 2000 schließlich folgte mit E26 der letzte GEM-Encounter. Ein Y2K-Problem trat bei Galileo zum Glück nicht ein. Auf das Jahr „99“ folgte einfach das Jahr „100“.

Noch immer lebte die Raumsonde. Einige Instrumente „schwächelten“ zwar inzwischen, dennoch gelangen die nächsten Vorbeiflüge I27, G28 und G29 - jetzt im Rahmen der „Galileo Millennium Mission“ (GMM) - praktisch fehlerlos. Während des G29-Vorbeifluges befand sich auch die Cassini-Sonde im Jupitersystem, so

dass simultane Messungen vorgenommen werden konnten. Insbesondere Magnetosphärenmessungen, Atmosphärenbeobachtungen, Ringebeobachtungen, aber auch „Mondfinsternisse“ von Io, Europa und Ganymed gehörten zum gemeinsamen Forschungsprogramm. Das eigentliche Ziel der Cassini-Sonde ist der Ringplanet Saturn, den sie am 1. Juli 2004 erreichen wird.

Im Jahr 2001 folgten der letzte Callisto-Vorbeiflug (C30), der unter anderem mit nur noch 4 Meter pro Pixel Bildauflösung die schärfsten Aufnahmen geliefert hat, die es jemals aus dem äußeren Sonnensystem gab, sowie drei weitere gezielte Io-Vorbeiflüge. Einer davon, I32, lief technisch perfekt ab, und die Raumsonde war im März 2002 trotz ihres „hohen Alters“ und der zahlreichen Durchflüge durch die starken Strahlungsgürtel des Jupitermagnetfeldes noch immer voll steuerbar. Die späten Io-Vorbeiflüge zeigten unter anderem, dass Io wahrscheinlich kein Eigenmagnetfeld besitzt. Für November 2002 ist noch ein naher Vorbeiflug am kleinen Mond Amalthea geplant (A34-Vorbeiflug), die Fernerkundungsinstrumente werden dabei aber nicht mehr zum Einsatz kommen. Im September 2003 schließlich soll Galileo durch Einsturz in der Jupiteratmosphäre „entsorgt“ werden.

5 Europa: Die Ozeanfrage

Die Ozeanfrage Europas gehört zu den wichtigsten Forschungsaufgaben im Sonnensystem und soll deshalb hier noch etwas im Detail erläutert werden. Welche Möglichkeiten gibt es, einen unterirdischen Ozean auf einem anderen Himmelskörper zu entdecken, und wie ist der Stand der Wissenschaft bei Europa?

Ein mögliches Argument für das Vorhandensein eines Ozeans ist die „non-synchronous rotation“, eine Art „Schlupf“ der Europakruste. Die Theorie besagt, dass eine Kruste, die sich über einem Ozean befindet, um einen winzigen Betrag schneller rotieren kann als der Rest des Körpers. Beträgt also die Zeit für eine Extrarotation z.B. etwa 10000 Jahre, würde Europa in dieser Zeit 1.000.000mal um Jupiter kreisen, während die obere Kruste 1000001 vollständige Umdrehungen ausführt. Tatsächlich wurden Oberflächenstrukturen entdeckt, die als Hinweis auf die Existenz der nichtsynchrone Rotation interpretiert werden können. Allerdings ist unklar, wie lange die Extraperiode dauern würde - vermutlich eher viele Millionen Jahre als Tausende von Jahren -, und außerdem bedeutet dieses Resultat nicht, dass dieser Prozess heute noch anhält. Die nicht-synchrone Rotation unterstützt also die Ozeanthese, kann aber (derzeit) nicht als Beweis angeführt werden.

An verschiedenen Orten auf Europa wurden die sogenannten Chaos-Gebiete entdeckt, deren prominentester Vertreter nahe dem 270. Längengrad liegt und den Namen Conamara Chaos erhalten hat (Abb. 4). Dort finden sich „Eisschollen“ in einer Matrix auf der Oberfläche, welche den Eindruck erwecken, in der Vergangenheit (auf einem flüssigen Medium?) auseinandergebrochen, abgetrieben sowie teilweise rotiert oder gekippt zu sein. Manche Geologen vertreten die Auffassung, dass dies nur durch einen Wasserozean erklärbar ist. Andere argumentie-

ren jedoch, dass auch "warmes" (vielleicht -20°C kalt, bei einer Oberflächentemperatur von um die -150°C), konvektierendes Eis solche Strukturen erzeugt haben könnte. Beiden Argumenten ist wiederum gemein, dass nichts über den Zeitpunkt der Entstehung gesagt werden kann. Die Chaos-Gebiete sprechen also für einen warmen Untergrund irgendwann in der Vergangenheit oder noch in der Gegenwart.



Abb. 4: Conamara-Chaos-Gebiet auf Europa; Bildauflösung: 9 m/pxl.

Ein weiterer wichtiger, aber noch ungeklärter Punkt ist die Entstehung der zahllosen Berggrücken. Es wurden mehrere Thesen vorgeschlagen, die sich im Wesentlichen in „kryo-vulkanisch“ und „tektonisch“ unterteilen lassen. Bei einer kryovulkanischen Entstehung wäre Untergrundwasser geysirartig durch lange Bruchzonen an der Oberfläche ausgetreten und hätte sich als eine Art Schnee an den Rändern abgelagert. Beim E19-Vorbeiflug wurde sogar speziell nach solchen „Geysiren“ gesucht, ohne dass man jedoch fündig wurde. Alternativ könnte auch ein Öffnen und Schließen von Spalten an der Oberfläche im Europa-Tages-Rhythmus von etwa 85 Stunden ein „Hochpumpen“ von „matschigem“ Eis und einer daraus resultierenden Berggrückenbildung als Erklärung herangezogen werden.

Die Verfechter der tektonischen Entstehung - z.B. durch Aufwölbung entlang von Bruchzonen über einer wärmeren, aufsteigenden Eismasse - führen hingegen an, dass man an einigen Bergflanken noch ursprüngliches Terrain sehen kann, das bei einer vulkanischen Entstehung zugeschüttet sein müsste. Dies ist jedoch nicht überall der Fall, häufig scheint auch eine neue Materialschicht auf den Berggrücken zu liegen. Sollte sich eine der kryovulkanischen Thesen als korrekt

herausstellen, wäre dies ein sehr starkes Indiz für eine Wasserschicht, die sogar relativ nahe unter der Oberfläche liegen müsste.

Wie kann man eventuell etwas über das absolute (geologische) Alter der Oberfläche aussagen? Radiometrische Altersbestimmungen scheiden aus, da zum einen keine Proben der Oberfläche zur Verfügung stehen, und zum anderen der Anteil an verwendbaren radioaktiven Isotopen in der aus fast reinem Eis bestehenden Oberfläche sehr gering sein dürfte. Bleibt also die Methode des „Kraterzählens“, die insbesondere am Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung des DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) in Berlin weit entwickelt worden ist. Das Grundprinzip - je mehr Krater pro Flächeneinheit, desto älter ist die Oberfläche im geologischen Sinn - ist einfach, die Details - Impaktorenflusssdichte, Größenhäufigkeitsverteilung, Targetmasse und -gravitation, Impaktorenkollisionsgeschichte, Impaktorenherkunft, heliozentrisch vs. planetozentrisch, uvm. - sind jedoch kompliziert. Während weitgehend Einigkeit herrscht, dass die meisten Krater im inneren Sonnensystem durch Asteroideneinschläge in der Frühzeit des Sonnensystems erzeugt wurden, besteht für das äußere Sonnensystem Uneinigkeit. Sollten auch hier die Asteroiden vorwiegend die Krater erzeugt haben, müsste auch die Europaoberfläche alt sein; im Schnitt mindestens mehrere Hundert Millionen Jahre. In diesem Fall wäre die Geschwindigkeit der geologischen Umwälzung der Oberfläche mit derjenigen der Erde vergleichbar, und ein Ozean nahe der Oberfläche eher unwahrscheinlich. Sollte jedoch der Hauptteil der Krater durch Kometen gebildet worden sein (deren Fluss leider nur sehr ungenau bekannt ist), würden die wenigen Krater auf Europa bedeuten, dass sich die Oberfläche innerhalb weniger Millionen Jahre komplett erneuert. In diesem Fall erscheint es sehr wahrscheinlich, dass der Ozean noch heute existiert.

Auch das Spektrometer VIMS (Visible and Infrared Mapping Spektrometer) an Bord der Galileosonde kann einen Beitrag liefern. Irdische Beobachtungen zeigten, dass die Oberfläche aus fast reinem Wassereis besteht. Kleine Asymmetrien in den Wasserabsorptionsbanden bei 1,5 und 2 Mikrometer Wellenlänge werden hingegen von einigen (nicht allen) Forschergruppen so interpretiert, dass die dunkleren Gebiete von hydratisierten Salzmineralen anstatt von Wassereis bedeckt sind, die möglicherweise aus einem salzigen Ozean an die Oberfläche vorgedrungen sind. Epsomit ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), Mirabilit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) und Natron ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) wurden im Detail untersucht, und zumindest Epsomit könnte unter Europabedingungen stabil genug sein, um Millionen, vielleicht sogar Milliarden Jahre auf der Oberfläche verbleiben zu können. Der Ozean würde dann Magnesium- und Sulfat-Ionen enthalten, ganz anders als unsere irdischen Meere, deren Salzgehalt vor allem auf Natrium- und Chlorid-Ionen zurückzuführen ist. (Anmerkung: Die angeführten Salzminerale sind ebenfalls weiß wie Wassereis; für die Braunfärbung weiter Oberflächenteile muss also ein weiterer, noch unbekannter Stoff verantwortlich sein).

Den bislang stärksten Hinweis auf die heutige Existenz eines Europa-Ozeans lieferte das Magnetometerexperiment. Europa besitzt kein Eigenmagnetfeld, sehr wohl aber ein induziertes Feld. Die gemessenen Charakteristika dieses Feldes (Stärke und Richtung in Abhängigkeit von der Raumschiffposition) werden mit Hilfe von Modellrechnungen so interpretiert, dass sie am besten durch einen oberflächennahen Elektrolyten erklärt werden können. Geochemisch kommt nur Salzwasser in Frage. „Ungünstigerweise“ wurde aber auch beim Mond Callisto ein induziertes Feld gemessen, und dass Callisto einen Ozean besitzen sollte, ist wahrlich schwer zu glauben (aber nicht unmöglich). Immerhin wirft dies die Frage auf, ob die Daten vielleicht noch anders interpretierbar sind. Seit kurzem schließlich wird auch eine Wasserschicht tief unter der Ganymed-Oberfläche vermutet. Eine endgültige Klärung der Ozeanfrage dürfen wir wohl frühestens im nächsten Jahrzehnt erhoffen. Für das Jahr 2008 war der Start der Europa-Orbiter-Mission der NASA geplant, die Jupiterankunft für 2010/11. Leider wurde Anfang 2002 die Finanzierung für dieses Projekt eingestellt, und es ist zur Zeit unklar, ob und wann Planungen für einen Europaorbiter wieder aufgenommen werden können.

Galileos Magnetfeldmessungen sind ein starker Hinweis auf die Existenz eines Europa-Ozeans, eine eindeutige Antwort auf die Ozeanfrage könnte jedoch am besten ein Höhenmesser (Laser-Altimeter) liefern. Die Theorie besagt, dass sich die europasche Eiskruste um etwa 20 bis 30 Meter im Verlauf eines Europa-Umlaufs um Jupiter hebt und senkt, wenn ein Ozean vorhanden ist. Sollte Europa jedoch durchgefroren sein, würde dieser Tidenhub weniger als einen Meter betragen.

Bleibt zu hoffen, dass eine Europa-Orbiter-Mission eines Tages erfolgreich durchgeführt werden kann. Sollte der Ozean tatsächlich entdeckt werden, stehen weitere Missionen in Aussicht: Zunächst ein Landefahrzeug zur Erkundung der Oberfläche, und später vielleicht ein „U-Boot“, das sich mit Hilfe einer Wärmequelle durch den Eispanzer hindurchschmelzen würde. Anschließend begänne eine Tauchfahrt in einem Ozean auf einer anderen Welt, eine dreiviertel Milliarde Kilometer von zu Hause entfernt. Wer weiß, worauf sie alles stoßen könnte... .

6 WWW-Adressen:

<http://www.dlr.de/galileo>

<http://photojournal.dlr.de/>

<http://www.jpl.nasa.gov/galileo/>